

一种输出反馈网络化控制系统及其稳定性

刘松晖^{1,2}, 吴俊¹, 徐巍华¹, 陈生³

(1. 工业控制技术国家重点实验室, 浙江大学 先进控制研究所, 浙江 杭州 310027;
2. 杭州职业技术学院 化学工程系, 浙江 杭州 310018; 3. 南安普敦大学 电子与计算机学院, 英国 南安普敦 SO17 1BJ)

摘 要: 为克服网络化控制系统中网络造成的信息反馈不及时问题, 提出一种输出反馈网络化控制系统. 通过引入被控对象的输入输出模型和缓存器, 该系统在网络畅通时刻可利用对象的实际输出计算控制量并刷新模型, 而在不能获得反馈信息的情况下, 则利用对象模型的输出值近似代替对象的输出值计算控制量. 在被控对象为单输入/单输出(SISO)且对象和模型存在误差的情况下, 推导出使该输出反馈网络化控制系统闭环稳定的充要条件. 仿真结果表明, 利用该充要条件, 可以很容易得到使系统稳定的模型误差范围.

关键词: 网络化控制系统; 输出反馈; 稳定性

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1008-973X(2008)03-0378-04

A output-feedback networked control system and its stability

LIU Song-hui^{1,2}, WU Jun¹, XU Wei-hua¹, CHEN Sheng³

(1. Institute of Advanced Process Control, State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Department of Chemical Engineering, Hangzhou Vocational Technology College, Hangzhou 310018, China; 3. School of Electronics and Computer Science, University of Southampton, Southampton, SO17 1BJ, UK)

Abstract: A kind of output-feedback networked control system was addressed to overcome the defect of feedback lag introduced by the network usage in the networked control system. By introducing a plant model and a buffer into this system, when feedback was available, this system could compute the control output and update the plant model with the plant output, otherwise, compute the control output based on the plant model output instead of plant output. On the condition that the plant was SISO and the error between plant and model existed, the necessary and sufficient condition for closed-loop stability of this system was derived. Simulation indicates that the range of model error within which this system is stable is easy to be derived by using this necessary and sufficient condition.

Key words: networked control system; output-feedback; stability

将控制回路通过网络进行闭环连接以实现实时反馈的控制系统称为网络化控制系统(networked control system, NCS)^[1]. 网络化控制系统实现了现场设备控制的分布化和网络化, 具有信息资源共享、连接数大大减少、易于扩展维护和高效灵活等特点. 然而, 由于网络化控制系统中所有设备分时占用同

一个网络信道, 必然导致控制系统输出信息不能及时反馈到控制器的情况, 成为网络化控制的一个难点问题.

针对上述控制难题, 许多研究者提出多种旨在降低其负面影响的控制方法^[2-3]. 其中可分为以满足系统控制性能(quality of performance, QoP)为目

收稿日期: 2006-12-10.

浙江大学学报(工学版)网址: www.journals.zju.edu.cn/eng

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60774001, 60736021, 60721062, 60374002); 国家“973”重点基础研究发展资助项目(2002CB312200); 教育部新世纪人才支持计划资助项目(NCET-04-0547); 111 引智计划资助项目(B07031); 英国皇家工程院资助项目.

作者简介: 刘松晖(1979-), 男, 江西南康人, 硕士生, 从事化工自动化的教学工作. E-mail: farer.shliu@163.com

通讯联系人: 吴俊, 男, 研究员, 博导. E-mail: jwu@iipc.zju.edu.cn

标的控制分析设计方法^[4-6],以满足网络通信服务质量(quality of service, QoS)为目标的网络调度方法^[7-8],以及兼顾 QoS 和 QoS 的方法^[9-11]. 兼顾 QoS 和 QoS 的方法在控制系统设计的同时考虑网络实现的问题,有利于系统性能的总体提升,因而这种策略已成为研究的主流. Montestruque 等人^[9-10]提出的基于模型的网络化控制方法均采用状态反馈或状态估计加反馈控制结构. 在实际工程应用中,直接测量状态往往是很困难的,而输出信号的测量要容易的多. 本文通过引入缓冲器和对对象输出的估计,把 Montestruque 等人^[9-10]提出的基于模型的网络化控制方法改造成一种适合于输出反馈结构的方法,并以一类单输入输出(SISO)被控对象为例,探讨该系统的稳定性.

1 输出反馈网络化控制系统

图 1 为本文提出的输出反馈网络化控制系统. 其中, $P(z)$ 为严格因果的离散被控对象, $C(z)$ 为离散控制器, $M(z)$ 为设计者建立的关于 $P(z)$ 的模型, 图 2 为一般的输出反馈控制系统, 将图 1 与图 2 相比较可以发现, 由于网络会影响对象输出 y_p 的及时反馈, 输出反馈网络化控制系统与一般的反馈控制系统相比增加了 $M(z)$ 和缓存器两个环节.

在图 1 中, 当时刻 $k \in \{0, 1, 2, \dots\}$ 时, $M(z)$ 输出 $y_m(k)$, $P(z)$ 输出 $y_p(k)$. 若此时刻网络是畅通的, 则将原来存放在缓存器中的历史输出数据和 $y_p(k)$ 一起发出, 将 $y_p(k)$ 送往控制器 $C(z)$ 与给定信号 $w(k)$ 一起用于计算控制量 $u(k)$, 同时将历史输出数据和 $y_p(k)$ 送往 $M(z)$ 用于更新其内部信息以使未来时刻的 y_m 更接近于 y_p ; 若此时刻网络繁忙不可用, 则将 $y_p(k)$ 存放在缓存器中, $C(z)$ 直接利用模型的输出 $y_m(k)$ 代替 $y_p(k)$ 以计算控制量 $u(k)$.

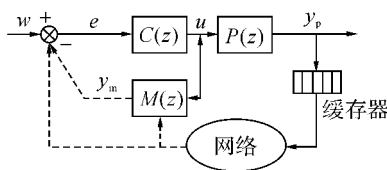


图 1 输出反馈网络化控制系统

Fig. 1 Output-feedback networked control system

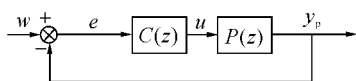


图 2 输出反馈控制系统

Fig. 2 Output-feedback control system

这样在对象输出不能及时反馈的情况下利用模型输出代替对象输出可以保证闭环控制运算不受影响. 在图 1 中, 网络与比较节点之间以及 $M(z)$ 与比较节点之间的虚线表示此两条通道不能同时被选用, 在每个时刻有且仅有一个虚线通道被选用. 因此图 1 可以等效为图 3, 在图 3 中开关 K_1 和 K_2 不能同时断开或闭合, K_1 断开 K_2 闭合表示网络通的情况, K_1 闭合 K_2 断开表示网络不通的情况.

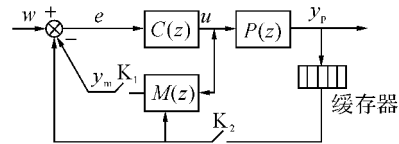


图 3 输出反馈网络化控制系统的等效示意图

Fig. 3 Equivalent schematic diagram of output-feedback networked control system

2 一类 SISO 网络化控制系统的稳定性

假定阶次均为 n 的 $P(z)$ 和 $M(z)$ 具有如下形式:

$$P(z) = \frac{\tilde{\beta}z^{-1}}{1 + \tilde{\alpha}_1 z^{-1} + \dots + \tilde{\alpha}_i z^{-i} + \dots + \tilde{\alpha}_n z^{-n}}, \quad (1)$$

$$M(z) = \frac{\beta z^{-1}}{1 + \alpha_1 z^{-1} + \dots + \alpha_i z^{-i} + \dots + \alpha_n z^{-n}}. \quad (2)$$

式中: $\forall i \in \{1, \dots, n\}$, $\tilde{\alpha}_i$ 和 $\tilde{\beta}$ 为未知常数, α_i 和 β 为已知常数. 假设当时刻 k 满足如下条件:

$$k = \tau + lh, \quad l \in \{0, 1, 2, \dots\}, \quad (3)$$

则网络通, 否则网络不通, 其中 h 称为网络接通间隔, 为已知的正整数, $\tau < h$ 是已知的非负整数. 当 $k \neq \tau + lh$ 时, 模型的运算为

$$y_m(k) = \beta_1 u(k-1) - \alpha_1 y_m(k-1) - \dots - \alpha_n y_m(k-n); \quad (4)$$

当 $k = \tau + lh$ 时, 模型利用网络传来的数据更新信息, 具体运算为

$$\left. \begin{aligned} y_m(k) &= y_p(k), \\ y_m(k-1) &= y_p(k-1), \\ &\vdots \\ y_m(k-h+1) &= y_p(k-h+1). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

这里需要注意的是: 当 $k = \tau$ 时, 更新的信息数量要少于 h .

控制器 $C(z)$ 的状态空间表达式为

$$\left. \begin{aligned} x_c(k+1) &= A_c x_c(k) + B_c (w(k) - y(k)), \\ u(k) &= C_c x_c(k) + D_c (w(k) - y(k)). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: A_c 、 B_c 、 C_c 、 D_c 为已知的具有合适维数的实矩阵, 且

$$\left. \begin{aligned} y(k) &= y_m(k); k \neq \tau + lh, \\ y(k) &= y_p(k); k = \tau + lh. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由式(5)~(7)可知,无论 k 是否等于 $\tau+lh$, $C(z)$ 的状态空间表达式总能写成

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_c(k+1) &= \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c(k) + \mathbf{B}_c (\omega(k) - y_m(k)), \\ u(k) &= \mathbf{C}_c \mathbf{x}_c(k) + \mathbf{D}_c (\omega(k) - y_m(k)). \end{aligned} \right\} (8)$$

设 $C(z)$ 能整定 $M(z)$, 则当 $P(z)$ 与 $M(z)$ 完全相等时, 无论 h 有多大, 图 3 所示系统都是稳定的. 但在实际中, 对象 $P(z)$ 与模型 $M(z)$ 之间总存在差别, 这就需要去研究对象与模型不尽相等的情况下式(1)、(2)和(8)所描述系统的稳定性. 令

$$\mathbf{x}_p(k) = \begin{bmatrix} y_p(k-n+1) \\ y_p(k-n+2) \\ \vdots \\ y_p(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

为 $P(z)$ 的状态, 则 $P(z)$ 的状态空间表达式为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_p(k+1) &= \mathbf{A}_p \mathbf{x}_p(k) + \mathbf{B}_p u(k), \\ y_p(k) &= \mathbf{C}_p \mathbf{x}_p(k). \end{aligned} \right\} (10)$$

式中:

$$\mathbf{A}_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -\tilde{\alpha}_n & -\tilde{\alpha}_{n-1} & -\tilde{\alpha}_{n-2} & \cdots & -\tilde{\alpha}_1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

$$\mathbf{B}_p = [0 \ 0 \ \cdots \ 0 \ \tilde{\beta}]^T. \quad (12)$$

$$\mathbf{C}_p = [0 \ 0 \ 0 \ \cdots \ 1]. \quad (13)$$

令

$$\mathbf{x}_m(k) = \begin{bmatrix} y_m(k-n+1) \\ y_m(k-n+2) \\ \vdots \\ y_m(k) \end{bmatrix} \quad (14)$$

为 $M(z)$ 的状态, 则可得 $M(z)$ 的状态空间表达式.

当 $k \neq \tau+lh$ 时

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_m(k+1) &= \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m(k) + \mathbf{B}_m u(k), \\ y_m(k) &= \mathbf{C}_m \mathbf{x}_m(k); \end{aligned} \right\} (15)$$

当 $k = \tau+lh$ 时

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_m(k+1) &= \mathbf{A}_m \mathbf{x}_p(k) + \mathbf{B}_m u(k), \\ y_m(k) &= \mathbf{C}_m \mathbf{x}_p(k). \end{aligned} \right\} (16)$$

在式(15)和(16)中

$$\mathbf{A}_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -\alpha_n & -\alpha_{n-1} & -\alpha_{n-2} & \cdots & -\alpha_1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\mathbf{B}_m = [0 \ 0 \ \cdots \ 0 \ \beta]^T, \quad (18)$$

$$\mathbf{C}_p = [0 \ 0 \ 0 \ \cdots \ 1]. \quad (19)$$

定义闭环系统状态

$$\mathbf{z}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_p(k) \\ \mathbf{x}_c(k) \\ \mathbf{e}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_p(k) \\ \mathbf{x}_c(k) \\ \mathbf{x}_p(k) - \mathbf{x}_m(k) \end{bmatrix}. \quad (20)$$

定理 1 设外部给定值信号 $\omega(k)$ 恒为零, 则对于 $k = \tau+lh+q, l \in \{0, 1, 2, \dots\}, q \in \{0, 1, \dots, h-1\}$, 有

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{\Lambda}^q \left[\mathbf{\Lambda}^h \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \right]^l \mathbf{z}(\tau). \quad (21)$$

式中:

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_p - \mathbf{B}_p \mathbf{D}_c \mathbf{C}_m & \mathbf{B}_p \mathbf{C}_c & \mathbf{B}_p \mathbf{D}_c \mathbf{C}_m \\ -\mathbf{B}_c \mathbf{C}_m & \mathbf{A}_c & \mathbf{B}_c \mathbf{C}_m \\ \mathbf{\Omega} & (\mathbf{B}_p - \mathbf{B}_m) \mathbf{C}_c & \mathbf{\Xi} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

其中

$$\mathbf{\Omega} = \mathbf{A}_p - \mathbf{A}_m - (\mathbf{B}_p - \mathbf{B}_m) \mathbf{D}_c \mathbf{C}_m, \quad (23)$$

$$\mathbf{\Xi} = \mathbf{A}_m + (\mathbf{B}_p - \mathbf{B}_m) \mathbf{D}_c \mathbf{C}_m. \quad (24)$$

证明: 当 $t \neq \tau+lh$ 时, 由式(8)、(10)、(15)和(20), 可得

$$\mathbf{z}(t+1) = \mathbf{\Lambda} \mathbf{z}(t); \quad (25)$$

当 $t = \tau+lh$ 时, 由式(8)、(10)、(16)和(20), 可得

$$\mathbf{z}(t+1) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_p - \mathbf{B}_p \mathbf{D}_c \mathbf{C}_m & -\mathbf{B}_p \mathbf{C}_c & \mathbf{D}_c \\ -\mathbf{B}_c \mathbf{C}_m & \mathbf{A}_c & \mathbf{0} \\ \mathbf{\Omega} & (\mathbf{B}_p - \mathbf{B}_m) \mathbf{C}_c & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{z}(t) = \mathbf{\Lambda} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{z}(t). \quad (26)$$

综合式(25)和(26), 即得式(21).

从定理 1 出发, 直接可以得到关于上述网络化控制系统闭环稳定的结论如下:

定理 2 设

$$\mathbf{M} = \mathbf{\Lambda}^h \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

则由式(1)、(2)和(8)描述的网络化控制系统稳定的充分必要条件是矩阵 \mathbf{M} 的谱半径 $\rho(\mathbf{M}) < 1$.

3 仿真算例

设被控对象模型为

$$M(z) = \frac{1.5z^{-1}}{1-1.5z^{-1}}; \quad (28)$$

被控对象模型为

$$P(z) = \frac{(1.5+b)z^{-1}}{1-(1.5+a)z^{-1}}. \quad (29)$$

其中,参数扰动 $a \in [-1, 1], b \in [-1, 1]$. 控制器为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_c(k+1) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}_c(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} (\omega(k) - y(k)), \\ u(k) &= [0.05 \quad 0] \mathbf{x}_c(k) + 0.65(\omega(k) - y(k)). \end{aligned} \right\} (30)$$

网络接通间隔 $h=3$.

对任意的 $a \in [-1, 1]$ 和 $b \in [-1, 1]$ 可以算出 Λ 和 M , 进而得到 $\rho(M)$. 图 4 的等高线图表示出不同 a 和 b 下的 $\rho(M)$ 值. 由定理 2 可知, 图 4 中处于标有 1 的等高线(即 $\rho(M) = 1$)之间的区域为闭环稳定区域.

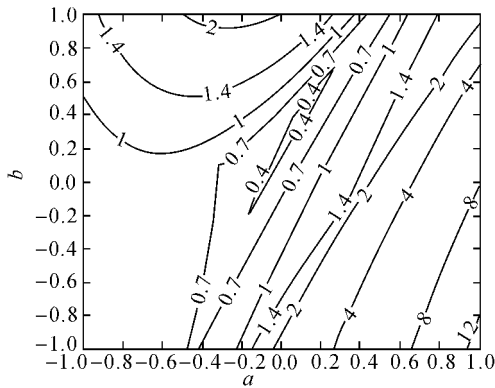


图 4 $\rho(M)$ 与参数扰动之间的关系

Fig. 4 Relationship between $\rho(M)$ and parameter alteration

4 结 语

本文提出的利用被控对象输入输出模型补偿反馈信息滞后的输出反馈网络化控制系统,在网络接通时刻,利用对象输出值刷新模型,可在一定程度上克服模型失配的影响,从而能够在一定的模型误差范围内保持稳定,仿真算例表明了这一点.

参考文献 (References):

[1] 黎善斌, 王智, 孙优贤. 网络控制系统的自整定鲁棒数字 PID 控制[J]. 浙江大学学报:工学版, 2004, 38(12): 1579 - 1584.
LI Shan-bin, WANG Zhi, SUN You-xian. Auto tuning robust digital PID control for networked control systems [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2004, 38(12): 1579 - 1584.

[2] TIPSUWAN Y, CHOW M Y. Control methodologies in networked control systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(10): 1099 - 1111.

[3] 黎善斌, 王智, 张卫东, 等. 网络控制系统的研究现状与展望[J]. 信息与控制, 2003, 32(3): 239 - 244.
LI Shan-bin, WANG Zhi, ZHANG Wei-dong, et al. Status and prospect of networked control system [J]. *Information and Control*, 2003, 32(3): 239 - 244.

[4] LUCK R, RAY A. An observer-based compensator for distributed delays [J]. *Automatica*, 1990, 26(5): 903 - 908.

[5] LUCK R, RAY A. Experimental verification of a delay compensation algorithm for intergrated communication and control systems [J]. *International Journal of Control*, 1994, 59(6): 1357 - 1372.

[6] CHAN H, ÖZGÜNERÜ. Closed-loop control of systems over a communication network with queues [C]// *Proceedings of the American Control Conference*. Baltimore, Maryland: IEEE, 1994: 811 - 815.

[7] HONG S H, KIM W H. Bandwidth allocation scheme in CAN protocol [J]. *IEEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 2000, 147(1): 37 - 44.

[8] 任旭东, 王智, 黎善斌, 等. 并行网络控制系统服务质量管理 [J]. 浙江大学学报:工学版, 2004, 38(7): 805 - 810.
REN Xu-dong, WANG Zhi, LI Shan-bin, et al. QoS management for parallel network control systems [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2004, 38(7): 805 - 810.

[9] MONTESTRUQUE L A, ANTSAKLIS P J. On the model-based control of networked systems [J]. *Automatica*, 2003, 39: 1837 - 1843.

[10] MONTESTRUQUE L A, ANTSAKLIS P J. State and output feedback control in model-based networked control systems [C]// *41st IEEE Conf Decision and Control*. Las Vegas: IEEE, 2002: 1620 - 1625.

[11] TIPSUWAN Y, CHOW M Y. Gain adaptation of networked mobile robot to compensate QoS deterioration [C]// *The 28th annual conference of the IEEE industrial electronics society (IECON 02)*. Sevilla, Spain: IEEE, 2002: 3146 - 3151.